

RÉVISEZ LA PHYSIQUE AVEC
FEYNMAN

Richard Feynman | Michael Gottlieb | Ralph Leighton

DUNOD

*First published in the United States
by Basic Books a member of the Perseus Books Group.*
L'édition originale de cet ouvrage a été publiée aux
États-Unis par Basic Books, un membre du groupe Perseus Books,
sous le titre : *Feynman's Tips on Physics (2nd edition)*
© 2013 by Carl Feynman, Michelle Feynman,
Michael A. Gottlieb, Ralph Leighton
Version française de Pierre Lochak et Laurent Lazzarini.

Une première édition de cet ouvrage a été publiée par
Pearson France en 2006 sous le titre :
Physique : les astuces de Feynman, 4 cours inédits

Maquette de couverture : Raphaël Tardif

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2014, 2021 pour la nouvelle présentation

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083516-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE À LA SECONDE ÉDITION AMÉRICAINE

Durant les six années qui se sont écoulées depuis la première publication des *Feynman's Tips on Physics* (2006, Addison-Wesley pour l'édition américaine ; *Physique : les astuces de Feynman*, Pearson France pour l'édition française) l'intérêt suscité par ce supplément aux *Feynman Lectures on Physics* ne s'est jamais démenti, comme illustré par le nombre toujours croissant de visiteurs du site des *Feynman Lectures* (www.feynmanlectures.info), créé en liaison avec ce projet. Des milliers de demandes ont afflué, dont beaucoup signalaient de possibles erreurs dans les *Feynman Lectures*, et beaucoup d'autres contenaient des questions ou des commentaires sur les exercices.

C'est donc avec un plaisir mêlé de fierté que nous présentons au public cette seconde édition des *Feynman's Tips on Physics*, publiée par Basic Books dans le cadre d'une unification des droits liés aux *Feynman Lectures on Physics*, droits d'impression aussi bien que ceux liés au son ou à l'image, et qui avaient été au fil des ans accordés à diverses maisons d'édition.

À cette occasion, les *Feynman Lectures on Physics* (*New Millennium Edition*) sont maintenant pour la première fois composées au format LaTeX, ce qui permet une correction des erreurs beaucoup plus rapide ; de plus une édition électronique des *Lectures* sera bientôt disponible. Enfin, cette nouvelle édition des *Feynman's Tips on Physics* est produite également dans une version brochée, à un prix très réduit par rapport à la version reliée originale, et est augmentée de trois entretiens pleins d'aperçus éclairants sur les *Lectures* :

- le premier avec Richard Feynman, en 1966, peu de temps après l'achèvement de la partie centrale du projet ;

Réviser la physique avec Feynman

- le second avec Robert Leighton, en 1986, à propos des dons de conférencier de Feynman ainsi que du défi que représente la traduction du « feynmanais » vers l'anglais ;
- enfin le troisième avec Rochus Vogt, en 2009, sur la communauté des professeurs à Caltech qui y ont enseigné les *Feynman Lectures* dans une étroite collaboration.

À tous ceux d'entre vous qui nous ont adressé – électroniquement ou par courrier – des questions et des commentaires sur les *Feynman Lectures on Physics* comme sur les *Feynman's Tips on Physics*, nous présentons nos remerciements les plus sincères ; vos contributions et votre soutien ont grandement contribué à améliorer ces livres et ils seront justement appréciés par des générations de lecteurs. Nous nous excusons auprès de ceux qui nous ont écrit pour réclamer davantage d'exercices, de ce que ceux-ci n'ont pu être inclus dans la présente édition. Cependant leurs encouragements ont inspiré la création d'un nouveau livre très complet (à paraître sous peu), les *Exercises for The Feynman Lectures on Physics*.

*Michael A. Gottlieb
Ralph Leighton
Novembre 2012*

TABLE DES MATIÈRES

Préface à la seconde édition américaine	III
Avant-propos	IX
Introduction	XI
L'étude de Matt Sands	XIV
Les quatre cours	XIV
Après le cours	XV
Les exercices	XV
Le site Internet	XVI
Remerciements	XVII
Origines du <i>Cours de physique de Feynman</i>	1
La réforme de l'éducation dans les années 1950	1
Le programme de Caltech	2
Impasse et inspiration	4
C'est Feynman qui donnera les cours	5
Le nouvel enseignement de physique	7
À quoi ressemblaient les cours	8
La décision de faire un livre	9
La préface de Feynman	11
Les second et troisième volumes	12
La réaction des étudiants	13
Pensées d'après coup	15
Un entretien avec Richard Feynman	17
Un entretien avec Robert Leighton	27
Un entretien avec Rochus Vogt	35

Chapitre 1. Prérequis	43
1.1 Introduction aux cours de révision	43
1.2 Caltech vu d'en bas	45
1.3 Mathématiques pour la physique	48
1.4 Dérivation	49
1.5 Intégration	52
1.6 Vecteurs	53
1.7 Dérivation des vecteurs	60
1.8 Intégrales curvilignes	63
1.9 Un exemple élémentaire	66
1.10 Triangulation	72
Chapitre 2. Lois et intuition	75
2.1 Les lois de la physique	75
2.2 L'approximation non relativiste	77
2.3 Mouvement sous l'action de forces	79
2.4 Les forces et leurs potentiels	82
2.5 Apprendre la physique par l'exemple	85
2.6 Comprendre la physique physiquement	87
2.7 Un problème de machine	91
2.8 Vitesse de libération de la Terre	104
Autres solutions (Par Michael A. Gottlieb)	107
Chapitre 3. Problèmes et solutions	111
3.1 Mouvement d'un satellite	111
3.2 La découverte du noyau atomique	117
3.3 L'équation fondamentale d'une fusée	121
3.4 Une intégration numérique	124
3.5 Les fusées chimiques	127
3.6 Fusées à propulsion ionique	128
3.7 Fusées à propulsion photonique	132
3.8 Un déflecteur électrostatique de faisceau de protons	133
3.9 La détermination de la masse du méson pi	136

Chapitre 4. Effets dynamiques et applications	139
4.1 Un gyroscope de démonstration	140
4.2 Le gyroscope directionnel	142
4.3 L'horizon artificiel	143
4.4 Un gyroscope stabilisateur de navire	145
4.5 Le gyrocompas	146
4.6 Progrès dans la conception et la construction des gyroscopes	150
4.7 Les accéléromètres	159
4.8 Un système complet de navigation	164
4.9 Les effets de la rotation de la Terre	168
4.10 Le disque en rotation	172
4.11 La nutation de la Terre	175
4.12 Le moment angulaire en astronomie	176
4.13 Le moment angulaire en mécanique quantique	178
4.14 Après l'exposé	179
Chapitre 5. Exercices choisis*	187
5.1 Conservation de l'énergie, statique (Vol. I, chap. 4)	188
5.2 Lois de Kepler et gravitation (Vol. I, chap. 7)	190
5.3 Cinématique (Vol. I, chap. 8)	190
5.4 Lois de Newton (Vol. I, chap. 9)	192
5.5 Conservation de la quantité de mouvement (Vol. I, chap. 10)	193
5.6 Vecteurs (Vol. I, chap. 11)	195
5.7 Chocs non-relativistes de deux corps dans un système à 3 dimensions (Vol. I, chap. 10 et 11)	196
5.8 Forces (Vol. I, chap. 12)	196
5.9 Potentiels et champs de forces (Vol. I, chap. 13 et 14)	198
5.10 Unités et dimensions (Vol. I, chap. 5)	199
5.11 Énergie et quantité de mouvement relativistes (Vol. I, chap. 16 et 17)	200
5.12 Rotations dans un système à 2 dimensions, centre d'inertie (Vol. I, chap. 18 et 19)	200

Révissez la physique avec Feynman

5.13 Moment cinétique, moment d'inertie (Vol. I, chap. 18 et 19)	202
5.14 Rotation en 3 dimensions (Vol. I, chap. 20)	203
Solutions	207
Crédits	213
Index	215

* Le Volume I de l'édition américaine du *Cours de physique de Feynman* correspond aux volumes *Mécanique 1* et *Mécanique 2* de l'édition française.

AVANT-PROPOS

Depuis un poste frontière isolé sur les hauteurs de l'Himalaya, Ramaswamy Balasubramanian observait à travers ses jumelles les soldats de l'Armée de libération populaire cantonnés au Tibet – lesquels l'observaient aussi. Cela faisait plusieurs années que les relations entre l'Inde et la Chine étaient tendues, depuis qu'en 1962 les deux pays avaient échangé des coups de feu à travers la frontière qu'ils contestaient. Les soldats chinois, se sachant observés, provoquaient Balasubramanian et ses camarades de l'armée indienne en brandissant, dans un geste de défi, leurs exemplaires de poche, rouge vif, des *Citations du Président Mao* – plus connu en Occident sous le nom de « Petit Livre rouge ».

Balasubramanian, qui était alors conscrit et étudiait la physique durant son temps libre, en eut rapidement assez de ces provocations. Un jour, il regagna donc son poste muni d'une réplique appropriée. Dès que les soldats chinois commencèrent à agiter le « Petit Livre rouge », lui et ses camarades indiens exhibèrent à bout de bras les trois gros volumes rouge vif du *Cours de physique de Feynman*.

Un jour, je reçus une lettre de M. Balasubramanian. Elle faisait partie des centaines de lettres que j'ai reçues pendant de nombreuses années et qui témoignent de l'impact durable de Richard Feynman sur la vie des gens. Après avoir raconté l'incident « livres rouges » à la frontière sino-indienne, il écrivait : « Et maintenant, vingt ans plus tard, lesquels de ces livres rouges sont encore lus ? »

C'est un fait. Aujourd'hui, plus de quarante ans après qu'il eut été prononcé, le *Cours de physique de Feynman* est toujours lu – et inspire toujours – y compris d'ailleurs, je le soupçonne, au Tibet.

Voici un cas intéressant : il y a quelques années, je rencontrai Michael Gottlieb dans une soirée au cours de laquelle notre hôte

montrait sur un écran d'ordinateur les harmoniques d'un chanteur de gorge de Tyva – un de ces petits événements qui rendent la vie dans la région de San Francisco si amusante et excitante. Gottlieb avait étudié les maths et il était intéressé par la physique ; je lui suggérais donc de lire le *Cours de physique de Feynman* – et environ un an plus tard, il consacra six mois de sa vie à une lecture très soignée du cours, de bout en bout. Comme Gottlieb le décrit lui-même dans son introduction, tout ceci aboutit au livre que vous tenez entre les mains, ainsi qu'à une nouvelle « édition de référence » du *Cours de physique de Feynman*.

Ainsi, je suis ravi que les gens du monde entier intéressés par la physique puissent maintenant étudier, grâce à l'ajout de ce volume supplémentaire, une édition plus correcte et plus complète du *Cours de physique de Feynman* – une œuvre monumentale qui continuera d'instruire et de faire réfléchir des générations d'étudiants dans les décennies à venir, que ce soit au cœur de Manhattan ou sur les hauteurs de l'Himalaya.

Ralph Leighton
11 mai 2005

INTRODUCTION



Richard Feynman, 1962 environ

J'ai entendu parler de Richard Feynman et Ralph Leighton pour la première fois en 1986, grâce à leur livre de divertissement *Vous voulez rire, M. Feynman!* [*Surely You're Joking, Mr. Feynman!*]. Treize ans plus tard, j'ai rencontré Ralph dans une soirée. Nous sommes devenus amis et, l'année suivante, nous avons travaillé ensemble à la conception d'un timbre fantaisie en l'honneur de Feynman¹. Tout au long de ce travail, Ralph me recommandait des livres, de ou sur Feynman, dont (puisque je suis moi-même pro-

1. Notre timbre est paru dans la notice de la pochette de *Back TUVVA Future*, un CD du maître de chant de gorge *Tuvan Ondar* dans lequel Richard Feynman apparaît aussi en personne (Warner Bros. 9 47131-2), paru en 1999.

grammeur informatique) les *Leçons sur la computation*¹. La discussion à propos du calcul quantique contenue dans ce livre fascinant m'avait intrigué mais, n'ayant pas étudié la mécanique quantique, j'avais peine à suivre les arguments. Ralph me recommanda de lire le troisième volume du Cours de physique de Feynman sur la mécanique quantique, ce que j'ai commencé à faire. Mais les chapitres 1 et 2 de ce volume reprennent les chapitres 37 et 38 du premier volume, si bien qu'au lieu de progresser dans le troisième volume, je suis revenu en arrière dans les références au premier. J'ai donc décidé de lire le Cours de physique de Feynman du début à la fin – j'étais décidé à apprendre de la mécanique quantique ! Cependant, avec le temps, ce but est devenu secondaire, au fur et à mesure que je me trouvais absorbé dans le monde fascinant de Feynman. La joie d'apprendre la physique, simplement pour le plaisir, est devenue ma première priorité. J'étais pris ! À la moitié environ du premier volume, j'ai fait une pause dans mon travail de programmation et j'ai passé six mois dans la campagne du Costa Rica à étudier les cours à plein-temps.

Chaque après-midi, j'étudiais un nouveau cours et je travaillais sur des problèmes de physique ; le matin, je révisais le cours de la veille. J'étais en contact avec Ralph par courrier électronique et il m'encouragea à dresser une liste des erreurs que je rencontrais dans le premier volume. Ce n'était pas un bien grand fardeau, parce qu'il y avait très peu d'erreurs dans ce volume. Cependant, alors que je progressais dans les deuxième et troisième volumes, je fus surpris de découvrir toujours plus d'erreurs. À la fin, j'avais compilé au total plus de 170 erreurs dans le Cours. Ralph et moi étions surpris : comment tant d'erreurs avaient-elles pu passer inaperçues si longtemps ? Nous décidâmes de voir s'il était possible de les faire corriger dans l'édition suivante.

C'est alors que je remarquai quelques phrases intrigantes dans la préface de Feynman :

1. *Leçons sur la computation*, par Richard P. Feynman, 2006, Odile Jacob, ISBN 2-738-11415-6.

« La raison pour laquelle il n’y a pas de cours consacrés à la manière de résoudre des problèmes est que ceux-ci constituent des sessions de révision. Bien que j’aie effectivement donné en première année trois cours sur la manière de résoudre des problèmes, ils ne sont pas repris ici. De même, il y avait un cours sur le guidage inertiel qui a sans aucun doute sa place après celui sur les systèmes en rotation, mais qui a malheureusement été omis. »

Cela suggéra l’idée de reconstruire les cours manquants et, s’ils se révélaient intéressants, de les proposer à Caltech et Addison-Wesley pour les inclure dans une édition complétée et corrigée du *Cours*. Mais tout d’abord il me fallait *trouver* les cours manquants, alors que je séjournais toujours au Costa Rica ! Avec un brin de logique et après quelques recherches, Ralph fut en mesure de retrouver les notes de ces cours, qui avaient été cachées quelque part entre le bureau de son père et les archives du Caltech. Ralph obtint aussi des enregistrements des cours manquants et, tandis que je recherchais les errata dans les archives après mon retour en Californie, je découvris par hasard les photographies du tableau (que l’on croyait perdues depuis longtemps) dans une boîte de négatifs divers. Les héritiers de Feynman nous donnèrent généreusement la permission d’utiliser ce matériel et c’est ainsi qu’avec les utiles critiques de Matt Sands – seul survivant du trio Feynman-Leighton-Sands – Ralph et moi avons reconstitué le *Cours de révisions B* et l’avons présenté à titre d’échantillon à Caltech et à Addison-Wesley, en même temps que les errata pour le *Cours*.

Addison-Wesley a réagi avec enthousiasme à nos idées, mais Caltech s’est d’abord montré sceptique. Ralph a alors fait appel à Kip Thorne, titulaire de la chaire Richard Feynman en physique théorique à Caltech, qui a fini par trouver un accord entre toutes les parties et a généreusement offert de son temps pour superviser notre travail. Comme Caltech se refusait, pour des raisons historiques, à modifier les volumes existants du *Cours*, Ralph a proposé de réunir les cours manquants dans un volume séparé. C’est là l’origine de ce volume supplémentaire. Il est publié en parallèle à la nouvelle *Définitive Edition of the Feynman Lectures on Physics*, dans laquelle les erreurs que j’avais trouvées sont corrigées, ainsi que d’autres erreurs repérées par un certain nombre d’autres lecteurs.

L'étude de Matt Sands

Dans notre quête pour la reconstruction des quatre cours, Ralph et moi nous sommes heurtés à beaucoup de questions. Nous avons eu beaucoup de chance de pouvoir obtenir des réponses du professeur Matt Sands, l'homme qui eut l'idée de démarrer l'ambitieux projet qui devait mener à la publication du *Cours de physique de Feynman*. Nous avons été surpris de constater que l'histoire de leur origine n'était pas largement connue ; aussi, après avoir réalisé que le présent projet offrait une occasion de combler cette lacune, le professeur Sands a aimablement accepté de rédiger une étude sur les origines du *Cours de physique de Feynman*, destinée à être incluse dans le présent supplément.

Les quatre cours

Nous apprîmes de Matt Sands qu'en décembre 1961, vers la fin du premier trimestre¹ du cours de Feynman en première année de physique à Caltech, il avait été décidé qu'il serait injuste d'introduire des notions nouvelles pour les étudiants quelques jours seulement avant l'examen final. C'est pourquoi, la semaine précédant l'examen, Feynman donna trois cours facultatifs de révision pendant lesquels il n'introduisait pas de notions nouvelles. Ces cours de révision s'adressaient à des étudiants qui avaient des difficultés en classe et il insistait sur des techniques utiles pour comprendre et résoudre des problèmes de physique. Certains exemples de problèmes avaient un intérêt historique, comme la découverte du noyau atomique par Rutherford et la détermination de la masse du méson pi. Avec un discernement humain qui lui était propre, Feynman discutait également de la solution à une autre sorte de problème, tout aussi important pour au moins la moitié des étudiants de cet amphithéâtre de première année : le problème émotionnel de se retrouver au-dessous de la moyenne.

1. À Caltech, l'année universitaire est divisée en trois trimestres : le premier de la fin septembre à début décembre, le second de début janvier à début mars et le troisième de fin mars à début juin.

Le quatrième cours, *Effets dynamiques et leurs applications*, a été donné au début du second trimestre de première année, peu après le retour des étudiants des vacances de Noël. À l'origine, il devait constituer le *Cours 21*, dans l'idée de reprendre son souffle après la discussion théorique difficile sur les rotations, qui couvre les chapitres 18 à 20 inclus ; il s'agissait donc de montrer aux étudiants quelques applications et phénomènes intéressants liés aux rotations, « juste à titre de divertissement ». La plus grande partie de l'exposé était consacrée à l'étude d'une technologie relativement nouvelle en 1962 : le guidage inertiel. Le reste de l'exposé concernait des phénomènes naturels résultant de diverses sortes de rotation et fournissait aussi un indice expliquant pourquoi Feynman avait décrit l'omission de ce cours dans le *Cours de physique de Feynman* comme « malheureuse ».

Après le cours

Feynman laissait souvent son micro branché après la fin du cours, d'où le témoignage unique que nous apportons sur la manière dont Feynman interagissait avec ses étudiants de premier cycle. L'exemple donné ici, enregistré après l'exposé *Effets dynamiques et leurs applications*, est particulièrement remarquable pour sa discussion sur la transition, alors imminente, des méthodes analogiques vers les méthodes digitales dans le domaine du calcul en temps réel.

Les exercices

Au cours de ce projet, Ralph a repris contact avec un bon ami et collègue de son père, Rochus Vogt, qui lui a gracieusement donné son consentement pour la republication d'exercices et de solutions tirés d'*Exercices de physique élémentaire* [*Exercises in Introductory Physics*], la collection que Robert Leighton et lui-même avaient créée spécialement en relation avec le *Cours*, dans les années 1960. Pour des raisons de place, je n'ai retenu que des exercices du premier volume, chapitres 1 à 20 (correspondant aux notions étudiées avant *Effets dynamiques et leurs applications*), avec une préférence pour les problèmes qui, pour citer Robert Leighton, « sont numériquement ou analytiquement simples, mais dont le contenu est pertinent et enrichissant ».

Révissez la physique avec Feynman

Le site Internet

Les lecteurs sont invités à visiter le site www.feynmanlectures.info pour plus d'informations concernant ce volume et le *Cours de physique de Feynman*.

Mike Gottlieb
Playa Tamarindo, Costa Rica
mg@feynmanlectures.info

REMERCIEMENTS

Nos remerciements les plus chaleureux vont à tous ceux qui ont rendu ce livre possible, et spécialement à :

Thomas Tombrello, directeur du département de physique, mathématiques et astronomie pour avoir approuvé ce projet au nom de Caltech, ainsi qu'à **Carl Feynman et Michelle Feynman**, héritiers de Richard Feynman, pour la permission qu'ils nous ont accordée de publier les cours de leur père dans ce volume ;

Marge L. Leighton, pour la permission qu'elle nous a accordée de publier des extraits de l'*Oral History* de Robert B. Leighton ainsi que des problèmes tirés des *Exercices in Introductory Physics* ;

Matthew Sands, pour sa sagesse, sa science, ses commentaires constructifs et ses suggestions ;

Rochus E. Vogt, pour les ingénieux problèmes et leurs solutions des *Exercices in Introductory Physics* et pour sa permission de les utiliser dans ce volume ;

Michael Hartl, pour sa relecture méticuleuse des épreuves du manuscrit et pour son travail diligent sur les errata du *Cours de physique de Feynman* ;

John Neer, pour la qualité des recherches documentaires qu'il a effectuées sur les cours de Feynman à la Hughes Aircraft Corporation et pour nous avoir fait profiter de ses notes de travail ;

Helen Tuck, secrétaire de Feynman durant de nombreuses années, pour ses encouragements et son soutien ;

Adam Cochran, pour son habileté consommée à naviguer dans le marais des contrats éditoriaux enchevêtrés et de personnalités diverses et variées, jusqu'à construire un cadre légal pour ce livre ainsi que pour le *Feynman Lectures ou Physics*.

Révissez la physique avec Feynman

Kip Thorne, pour sa gentillesse et ses efforts infatigables pour s'assurer de la confiance et du soutien de tous les participants à cette entreprise, ainsi que pour avoir supervisé notre travail.